

植物由来有機物を考慮した鉛直流人工湿地モデルに関する研究

著者	谷口 崇至
号	56
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4661号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61810

氏 名	谷 口 崇 至
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 24 年 3 月 27 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	植物由来有機物を考慮した鉛直流人工湿地モデルに関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 西村 修
論文審査委員 主査	東北大学教授 西村 修 東北大学教授 大村 達夫
	東北大学教授 原田 秀樹 東北大学准教授 李 玉友
	東北大学准教授 中野 和典

論 文 内 容 要 旨

近年『カーボンミニマム』の概念を満たす技術として期待され世界的に普及しつつあるのが、湿地生態系が本来持つ浄化機能を人為的に強化した人工湿地を用いて水処理を行わせようという生態工学に基づく湿地浄化法である。この技術は砂やレキで構成された基盤に植物を植栽し、そこに形成される生態系を利用して汚濁物質を除去する。水処理に必要なエネルギーはポンプのような動力に要するわずかなエネルギーを除けば、太陽光が主要なエネルギー源である。この簡易な構造と省エネルギーという点より造成や運用のコストが非常に安い技術であり、そしてまたエネルギー消費が少なくまた脱窒のための有機物投入を必要としないなど「カーボンミニマム」な技術として知られてきた。この特性より世界中で都市下水処理や生活排水処理に利用されており、さらに近年では工業・農業排水、雨水処理や最終処分場浸出水に適用が進むなど利用範囲を拡大している。また人工的に湿地生態系を創出できる点に着目し、都市域での水処理及び生態系創出技術という位置づけで持続的都市排水システム（SUDS）としてユネスコ指導の下、ヨーロッパ、アジア、アフリカ、南米の様々な都市で人工湿地が導入されており、実効力のある「自然調和型技術」としても期待できる。

我が国においても過去、建設省により霞ヶ浦で浄化実験が行われており、また農林水産省によっても家庭排水および下水二次処理水に対して浄化実験が行われている。また最近では北海道における実規模人工湿地の処理性能に関しての報告も行われており、北海道のような亜寒帯に属する寒冷地でさえも良好な処理性能を得られることが明らかになっている。

しかし人工湿地における窒素除去は不明な点が多く、特に最終処分場浸出水や下水二次処理水のような低 COD/N 比廃水を処理する鉛直流人工湿地の窒素除去過程において植物由来有機物がどのように働いているのか解明には至っていない。これは鉛直流人工湿地内部での反応が非定常に変化する水分動態や多成分が同時に反応している非常に解析の困難な系であることに起因している。このような様々な飽和度を取りうる人工湿地の多成分反応輸送動力学を解析するための数学的ツールとして、活性汚泥モデル ASMs に基づき Constructed Wetlands 2 dimensional (CW2D)が開発されている。これまでに幾つ

かの解析事例が存在しており、実績を挙げつつあるが、CW2D では植物由来有機物は考慮されていないため植物由来有機物が窒素除去過程でどのように働いているのか解析することは出来ない。その理由は多量に易分解性有機物を含んでいることで植物による有機物供給が重要でないと考えられていることを反映したためである。しかし最終処分場浸出水や下水二次処理水のような低 COD/N 比廃水では、植物由来有機物が脱窒を律速するため窒素除去過程における植物由来有機物の働きを解析し評価することは重要な意味を持つと考えられる。

このような背景から、本研究では低 COD/N 比廃水を処理する人工湿地の窒素除去過程における植物由来有機物の働きを解明するために、まず実験データの収集を行い窒素除去特性の解析を行なったのちに、植物由来有機物を考慮したモデルを開発し得られた実験値を再現するための数値的検討を行なった。

実験的検討としては、最終処分場浸出水における硝化および脱窒の進行特性の評価と実験データの収集を目的として、最終処分場内に設置したベンチスケールの鉛直流人工湿地による硝化・脱窒実験を行なった。主な検討内容は、硝化・脱窒性能の評価と化学量論解析によるアルカリ度や有機物収支の解析などである。

一方、数値的検討は鉛直流人工湿地において植物由来有機物を考慮しない場合の窒素除去に相当する人工湿地モデル CW2D による解析を行い、課題を整理した。整理した課題をもとに植物由来有機物の内部生産 (Internal Production) の概念を導入した CW2D-IP モデルを開発し、CW2D と等価とみなせる有機物供給が無い場合のモデルの適用性について確認した後に、植物由来有機物が窒素除去過程で果たす役割を確認した。次いで、CW2D-IP のモデルとしての妥当性について評価を行い、課題について検討を行なった。

実験的検討の結果、以下に記す鉛直流人工湿地における窒素除去性能を得た。流出水中の NH_4N 濃度は徐々に低下し、90 日以降では平均 $6.7 \text{ mg-NH}_4\text{N L}^{-1}$ で安定して推移した。流出水の NH_4N 濃度が低下するとともに NH_4N 除去率は上昇し、流出水濃度が安定する 90 日以降では流入水温が 10°C 程度にまで低下しても NH_4N 除去率 90% を維持した。それに対して流出 TN 濃度は運転開始から実験終了までの 120 日間で安定しており、平均 $34.8 \text{ mg-TN L}^{-1}$ で推移した。TN 除去率も同様に安定しており、温度と関係なく平均 57% で安定していた。物質収支解析より、 NH_4N 除去率 90% を達成する場合に必要なアルカリ度の回復は硝化が進行した後に続く脱窒反応により供給されていることが示唆された。脱窒によるアルカリ度回復機構が存在しているものの、それは一部を充足するのみであり、アルカリ度は 36% が不足していると考えられた。また、有機物に関しては流入有機物の全てが脱窒に利用されたとしても脱窒で必要となる有機物量を充足せず、脱窒に利用された有機物の少なくとも 88% が人工湿地根圏の菌体や植物による内部生産由来であり、低 COD/N 比の廃水では窒素除去において人工湿地の内部生産が非常に重要であることが示された。

一方、植物由来有機物供給のモデル化に当たっては、まず植物由来有機物を考慮した人工湿地モデルのベースモデルとなる CW2D の鉛直流人工湿地における窒素除去の適用性を確認した。各種物理・化学・生物反応パラメータは文献値に対してアレニウス式により温度補正したものを用いた。また水分動態を示すための水理モデルである van Genuchten モデルのパラメータは現場の流出入水分フラックスより決定した。これらのパラメータを用いて鉛直流人工湿地における窒素除去性能を供試データとし、その再現性について評価を行った。鉛直流人工湿地の数値シミュレーションの結果、再ばつ気係数として既往の文献値を用いた場合には窒素除去過程は硝化・脱窒ともに再現が出来ないことを確認した。再

ばっ気係数の再検討により硝化の再現は可能であることが示されたものの、脱窒に関しては再ばっ気係数に関係なく全く再現できないことが明らかとなった。有機物と無機態窒素の鉛直濃度分布の解析により、この原因が有機物酸化と硝化の酸素を巡る競合にあることが示され、高い脱窒が進行する場合には有機物の内部生産を考慮しなければならないことが明らかとなった。鉛直流人工湿地の窒素除去において TN 除去率は CW2D で再現できる範囲を超える水準の TN 除去率が多数報告されていることから、この結果は本研究にとどまらず、鉛直流人工湿地全般に対する CW2D の適用性についての課題であると考えられた。

次に第三章および第四章で確認したことをふまえ、人工湿地内部生産有機物、特に植物リター由来の有機物を人工湿地根圏で形成される有機物供給ポテンシャルとして易分解性有機物の反応輸送方程式に組み込み、植物のリター蓄積構造に起因する有機物供給パターンの違いが窒素除去性能についてどのような影響を与えるのか、再ばっ気係数を用いて感度分析を行った。有機物供給パターンとして、第一近似として用いられることの多い一様均質（基盤表面から 0~60 cm）、表層供給（基盤表面から 0~10 cm）、中層供給（基盤表面から 30~40 cm）、深層供給（基盤表面から 50~60 cm）の四つの有機物供給パターンについてシミュレーションを行った。

シミュレーションの結果、基盤内部で一様均質に発生する有機物供給パターンでは TN 除去率の上昇が確認できたものの、窒素除去の再現は出来なかった。表層供給では、均質供給と異なり有機物供給が強い硝化阻害を示し有機物供給速度に関係なく TN 除去率を低下させた。また中層供給では、 NH_4N 除去率、TN 除去率の両方を再現できる条件が存在することが示された。そして深層供給でも中層供給と同様に硝化が進行しやすく脱窒も促進されるという傾向が示されたが、TN 除去率は中層供給ほど高くはならなかった。

このような結果を生じた理由を探るために各供給パターンの NH_4N 、 NO_3N の鉛直濃度分布の解析を行ったところ、表層供給では硝化が十分に進行していない段階で有機物が供給されることで強い硝化阻害を発生させることが示された。これに対して中層供給では、窒素除去を再現した再ばっ気係数条件の下で、有機物が供給される領域よりも上層において硝化を十分に進行させていた。このことから実験値の NH_4N 除去率 90%、TN 除去率 57% が再現できたのは、硝化が十分に進行した後には有機物が脱窒に充当されたためであることが分かった。深層供給では中層供給と同様に NH_4N 濃度は流下するほどに濃度低下を示していたが、中層付近で硝化がそれ以上進行しなくなり濃度低下は横ばいとなった。それ以降流下するにつれ再ばっ気による溶存酸素濃度の回復が生じるために、深層部での溶存酸素による脱窒阻害を発生させていることが示された。これらの効果が複合・干渉したために均質供給で窒素除去を再現できなかったと考えられる。このような機構を通して、鉛直流人工湿地は経年するとともに離散的なリター蓄積を行い、これにより形成される特異的な有機物供給場が窒素除去性能を高めていることが示唆される。

本研究の総括を示す。本研究の目的である植物由来有機物の鉛直流人工湿地における役割の評価に関して低 COD/N 比廃水処理実験では植物由来の有機物内部生産は窒素、有機物動態に非常に大きな影響を及ぼしていることが示された。そしてそれを裏付けるように、植物由来の有機物を無視した CW2D のような人工湿地モデルでは高い窒素除去性能を有する鉛直流人工湿地の除去過程の再現は出来なかったことが分かった。この問題は COD/N 比に関係なく生じることから、植物由来有機物を考慮することは鉛直流人工湿地の窒素除去をシミュレーションする上で欠かせない要素であることが示された。しかし

植物由来有機物の供給は離散的な分布かつ中層付近に易分解性有機物供給層が出現する場合に限って高い水準の窒素除去を達成する非常に特異的な反応である。そのため鉛直流人工湿地の窒素除去性能の高度化は非常に難しい問題であり、植物由来有機物の分解や輸送のような非定常に変化する内部生産有機物動態に関するさらなる知見を集積することが必要である。

論文審査結果の要旨

エネルギー問題や気候変動を緩和するための低炭素社会の必要性を背景として、世界各地で人工湿地による排水処理が普及し始めている。人工湿地における水質浄化機構は、湿地基盤におけるろ過・吸着作用と根圏微生物による分解作用で説明されるが、その水質浄化プロセスを記述したこれまでの動力学モデルにおいては、植物が果たす役割が無視されてきた。本論文は、人工湿地における窒素除去プロセスにおける植物由来有機物の重要性に焦点を当て、最先端の動力学モデルに植物由来有機物の存在を組み入れることで実験値の再現を試みるとともに、その再現性の比較により人工湿地における植物由来有機物の供給パターンと窒素除去性能の関係を明らかにすることを試みたものであり、全編5章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章は関連する既往の研究のレビューであり、人工湿地における水理学的プロセスと水質浄化プロセスを表現するための最先端の動力学モデル（CW2D）と本論文で提案する植物由来有機物の存在を組み入れたモデル

（CW2D-IP）の位置付けを明らかにしている。

第3章では、C/N比が小さいことを特徴とする埋立地浸出水を処理対象とし、鉛直流人工湿地で得られる窒素除去性能を把握するとともに、その処理過程における有機物と窒素の物質収支の解析結果より、流入有機物だけでは窒素除去が成立しないことを明らかにしている。これは新規な知見である。

第4章では、CW2D-IPにおける2つの動力学パラメーター（再曝気係数および植物由来有機物存在量）と第3章で得られた窒素除去性能の再現性の関係について、4つの植物由来有機物の供給パターンで比較することで、人工湿地における窒素除去プロセスにおける植物由来有機物の重要性を証明するとともに、実験値を再現可能なパラメーターの範囲が限定されること、有機物の供給深さによって窒素除去に対する影響が全く異なることを明らかにしている。これは特に新規かつ有用な知見である。

第5章は、総括である。

以上要するに本論文は、人工湿地における窒素除去プロセスに関して、これまで顧みられて来なかった植物由来有機物に着目することで窒素除去性能の予測を可能とする動力学モデルを確立することに成功しているだけでなく、モデルをベースとしたアプローチにより、実験的証明が難しい人工湿地における植物由来有機物の果たす役割とその理論的根拠を明らかにしたもので、環境工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。